

模拟 N/S 沉降对米槠天然林土壤 N 净转化速率和 N₂O 排放的影响

陆建芳, 李任超, 高人*, 马红亮, 韩世忠, 刘功辉 (福建师范大学地理科学学院, 福建福州 350007)

摘要 [目的] 研究 N/S 沉降对中亚热带米槠天然林土壤硝化作用和 N₂O 排放的影响。[方法] 室内用 NH₄NO₃/K₂SO₄ 模拟 N/S 沉降, 在 30 ℃ 和 60% WHC 水分条件下, 恒温培养 15 d。在培养的第 1、5、10 和 15 天测定土壤 NH₄⁺-N、NO₃⁻-N 和 pH, 在培养的第 3、4、5 和 10 天采集气体样品测定 N₂O 浓度。[结果] N 沉降和 NS 复合沉降在 0.05 水平显著促进土壤的矿化和硝化, 且促进效果随沉降强度或 NS 复合沉降中 N 的比例增大而增大, 但 S 沉降的促进作用不显著; 土壤净矿化速率和净硝化速率与土壤 pH 具有极显著的负相关性。土壤在自然状态和 N/S 沉降的影响下, 有机氮净矿化速率与净硝化速率之间均存在显著相关性, 且矿化速率大于硝化速率。N 沉降和 NS 复合沉降显著提高土壤的硝化率在 N/S 沉降下, 该区土壤中的无机氮仍以 NH₄⁺-N 为主, 硝化作用弱, 铵态氮的供给不成为土壤硝化作用的限制因素。NS 复合沉降促进土壤 N₂O 的排放, 具体机理有待进一步揭示。[结论] N 沉降和 NS 复合沉降明显促进土壤的矿化和硝化作用, S 沉降对土壤的矿化和硝化作用的影响不大; NS 复合沉降影响土壤的 N₂O 排放, 且其影响效应与沉降中 N、S 的比例相关, 在有关酸沉降对土壤 N₂O 排放的影响方面, S 沉降应受到关注。

关键词 N 沉降; S 沉降; 硝化作用; N₂O 排放; 森林土壤

中图分类号 S154.1 文献标识码 A 文章编号 0517-6611(2014)01-00095-04

Soil Net N Transformation Rates and N₂O Emission Affected by Simulated N/S Deposition for a Natural Forest of *Castanopsis carlesii* of Northern Midsubtropics of China

LU Jian-fang et al (College of Geographical Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou, Fujian 350007)

Abstract [Objective] The impacts of nitrogen and/or sulfur deposition on the soil nitrification and nitrous oxide emissions were investigated for *Castanopsis carlesii* community which is a typical vegetation form of evergreen broadleaved forests in the northern Midsubtropics of China.

[Method] Ammonium nitrate and potassium sulfate were used in lab incubation experiments to simulate nitrogen and/or sulfur deposition under the conditions of 30 ℃ of room temperature and 60% of soil water holding capacity (WHC). Soil pH values and the contents of soil ammonium nitrogen, nitrate nitrogen were determined at the 1st, 5th, 10th and 15th day after incubation, and nitrous oxide concentrations were determined at 3rd, 4th, 5th and 10th day. [Result] Soil mineralization and nitrification were promoted for nitrogen deposition, or N and S mixed deposition while no significant difference showed for sulfur deposition. There was a very pronounced negative relationship between soil net mineralization rate and soil pH value as well as between soil net nitrification rate and pH value. There was a significant positive correlation relationship between soil net mineralization rate and soil net nitrification rate either for controlled soil or soil amended with N and/or S. While the ratio of NO₃⁻-N to (NH₄⁺ + NO₃⁻)-N was increased with nitrogen deposition, or N and S mixed deposition, NH₄⁺-N was still the dominant forms in the soil inorganic nitrogen species under the influences of acid deposition in this area. The nitrification is weak in this area and the supply of ammonium would not become the limiting factor of soil nitrification. Mixed nitrogen and sulfur deposition promoted the emissions of nitrous oxide, which mechanism need further elucidation in the future. [Conclusion] The results suggested that nitrogen deposition or N and S mixed deposition would stimulate soil mineralization and nitrification, while sulphur deposit had no effect on the above processes. Mixed nitrogen and sulfur input promoted the emissions of nitrous oxide, which might be related to the nitrogen proportion in the mixed deposition, and so the role of sulphur can not be ignored when we investigate acid deposition effects on nitrous oxide emission.

Key words Nitrogen deposition; Sulfur deposition; Nitrification; N₂O emission; Forest soil

由于工农业生产、交通运输、城市化进程加快, 人类活动向大气中排放大量氮化物和硫化物, 直接导致酸沉降的增加^[1]。酸沉降作为全球性的环境问题已经备受关注。我国南方已成为继欧洲、北美之后的第三大酸沉降区, 且有不断发展的趋势^[2]。森林作为陆地生态系统的主体, 是酸沉降的主要受体^[3], 同时森林土壤是 N₂O、CO₂ 等主要温室气体重要源、汇地之一^[4-5], 在减缓全球气候变化过程中发挥着重要作用, 因此在全球变暖背景下对酸沉降影响森林土壤物质循环和温室气体排放的研究日益成为当今生态和环境学界共同关注的焦点之一^[6-7]。近年来, 酸沉降对土壤 N 素转化、N₂O 排放影响的研究在国内已有报道, 但主要集中于模拟 N 沉降^[8-10], 而对 S 沉降或 NS 复合沉降的研究很少。福建省 65% 的陆地面积处在华东酸沉降区内^[11], 成为酸雨严重地区之一。屈玉^[12]对福建省 S 沉降量变化进行分析与

比较, 发现福建省的酸沉降属于硫酸型沉降。该研究以福建省建瓯市万木林自然保护区米槠常绿阔叶天然林为研究对象, 通过室内模拟酸沉降, 研究 N/S 沉降对中亚热带森林土壤 N 素转化和 N₂O 排放的影响, 为探明酸沉降对森林生态系统物质循环和温室气体减排提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究地概况 供试土壤所在地福建省建瓯市万木林自然保护区(27°3'N, 118°9' E)地处武夷山和鹫峰山交界处, 属中亚热带季风气候, 年均气温 19.4 ℃, 年降水量 1 731.4 mm, 年蒸发量 1 466 mm, 相对湿度 81%, 全年无霜期 277 d。土壤为花岗岩发育的红壤。采用随机采样法采取森林土壤地表 0~20 cm 土壤, 充分混合后风干, 过 2 mm 筛后保存备用。土壤基本性质为: 有机质含量 38.20 g/kg, 全 N 含量 1.28 g/kg, 全 P 含量 0.27 g/kg, 水解 N 146.9 mg/kg。

1.2 试验处理

1.2.1 预培养。 分别称取相当于 30 g 烘干土的土壤置于 300 ml 广口瓶中, 加入蒸馏水调节土壤含水量至 40% WHC, 保鲜膜封口, 用直径为 1 mm 的针头在膜上打 6 个小孔, 保证

基金项目 国家自然科学基金项目(31070548, 31170578)。

作者简介 陆建芳(1989-), 女, 福建屏南人, 硕士研究生, 研究方向: 森林生态系统碳氮循环。*通讯作者, 教授, 从事森林碳氮循环方面的研究, E-mail: r. gao@ hotmail. com。

收稿日期 2013-12-10

瓶内外气体自由流通,在 30 ℃ 下恒温预培养 7 d。期间,定期称重以补充损失的水分。

1.2.2 试验设计与培养。向上述预培养的土壤样品中分别加入 NH_4NO_3 、 K_2SO_4 以及 NH_4NO_3 和 K_2SO_4 以模拟 N 沉降、S 沉降和 NS 复合沉降,其中 N 沉降设置 3 个水平,分别为 0 mg N/kg(CK)、100 mg N/kg(LN)、150 mg N/kg(HN),S 沉降设置 3 个水平,分别为 0 mg S/kg(CK)、40 mg S/kg(LS)、80 mg S/kg(HS),共计 9 个处理,分别标记为 CK、LN、HN、LS、HS、LNLS、HNLS、LNHS、HNHS。每个处理 3 个重复。调节土壤含水量至 60% WHC,保鲜膜封口,用直径为 1 mm 的针头在膜上打 6 个小孔,保证瓶内外气体自由流通,放回 30 ℃ 的恒温箱中培养,定期补充因蒸发损失的水分。

在培养的第 1、5、10 和 15 天,每个处理分别取出 3 个样品,测定土壤 pH、 NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N,在培养的第 3、4、5 和 10 天进行抽气。初次采气时揭去保鲜膜,抽取瓶内气体 20 ml 注入 20 ml 真空瓶内作为初始气体浓度,记录抽气时间。用硅胶塞密闭瓶口后放回培养箱中继续培养 4 h,用注射器将瓶内空气混匀后立即采集气体 20 ml,注入 20 ml 真空瓶内,并且再次记录采样时间,测定气体样品 N_2O 浓度。

土壤 pH 由 DMP-2 mV/pH 计测定,土水比为 1.0:2.5 (V/V)。 NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 含量由流动分析仪 (SKALAR San⁺⁺, 荷兰)测定。 N_2O 浓度由气象色谱分析仪 (GC-2014, 日本岛津)测定,检测器为电子捕获检测器 (ECD),氙甲烷为载气。

1.3 计算方法 有机氮净矿化速率根据培养期间无机氮

(NH_4^+ -N + NO_3^- -N) 含量变化与培养时间计算;在培养过程中 NO_3^- -N 含量增加量被称为净硝化量,记为 ΔN ;净硝化速率根据培养期间 NO_3^- -N 含量变化与培养时间计算。硝化率定义为 NO_3^- -N 占无机氮 (NH_4^+ + NO_3^-) 总量的百分数^[6]。

$$\text{N}_2\text{O 排放通量的计算方法为: } F = k \cdot \frac{V}{m} \cdot \frac{\Delta c}{\Delta t} \cdot \frac{273}{273 + T}$$

式中, F 表示气体产生速率 ($\mu\text{g}/(\text{kg} \cdot \text{h})$); k 为常数,取值 1.964 (kg/m^3); $\Delta c/\Delta t$ 为气体在观测时间内浓度随时间变化的直线斜率; V 为培养容器体积 (m^3); m 为土重 (kg); T 为培养温度 ($^\circ\text{C}$)^[13-14]。

1.4 数据处理 所有数据均采用 Excel 2003 和 SPSS17.0 进行统计分析和作图。各处理间净矿化速率、净硝化速率、无机氮含量、硝化率及 N_2O 排放的差异显著性检验采用单因子方差分析 (ANOVA) 和最小显著差异法 (LSD),采用双因素方差分析法检验 N、S 沉降间的交互作用。

2 结果与分析

2.1 N/S 沉降对土壤 pH 的影响 从表 1 可以看出,N/S 沉降降低了土壤 pH,土壤的 pH 降低量随着 N、S 沉降量的增加而增加。N 沉降和 S 沉降对土壤 pH 的影响显著 ($P < 0.05$),N、S 沉降的交互作用对土壤 pH 影响显著。N/S 沉降对土壤 pH 的影响程度大小顺序为 NS 复合沉降 > N 沉降 > S 沉降。在沉降初期,土壤 pH 下降;随后,土壤 pH 总体随培养时间的延长而升高;在培养最后期,土壤的 pH 出现小范围的下降,其中不同处理的 pH 存在差异。

表 1 N/S 沉降对土壤 pH 的影响

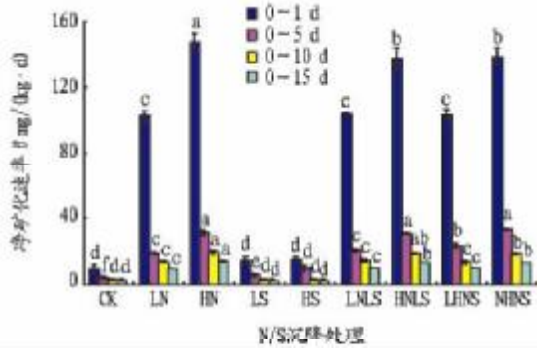
处理	培养时间			
	第 1 天	第 5 天	第 10 天	第 15 天
CK	4.61 (0.15) a	4.86 (0.03) a	4.78 (0.03) a	4.78 (0.04) a
LS	4.36 (0.02) b	4.57 (0.03) b	4.59 (0.05) b	4.56 (0.06) b
HS	4.23 (0.09) bc	4.43 (0.01) c	4.48 (0.03) c	4.47 (0.02) c
LN	4.15 (0.05) c	4.34 (0.03) d	4.36 (0.02) d	4.30 (0.12) d
HN	4.06 (0.08) cd	4.25 (0.01) de	4.24 (0.04) e	4.28 (0.03) de
LNLS	4.13 (0.08) cd	4.29 (0.03) d	4.33 (0.02) d	4.28 (0.04) de
LNHS	4.07 (0.12) cd	4.26 (0.01) d	4.24 (0.02) e	4.23 (0.02) de
HNLS	4.02 (0.13) cd	4.17 (0.06) e	4.22 (0.03) e	4.18 (0.01) e
HNHS	3.96 (0.05) d	4.20 (0.04) e	4.23 (0.02) e	4.20 (0.01) e

注:表中括号内数据为标准误。同列不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

2.2 N/S 沉降对土壤有机氮净矿化速率的影响 由图 1 可知,N 沉降对土壤有机氮净矿化速率的影响显著,S 沉降对土壤有机氮净矿化速率无显著影响,N、S 沉降对土壤有机氮净矿化速率的影响无交互作用。随着培养天数的增加,所有处理的土壤净矿化速率均降低。不同水平 N 沉降处理的 CK、LN 和 HN 土壤的有机氮净矿化速率在整个培养过程中均呈显著差异 ($P < 0.05$),其中 CK 显著低于 LN、HN 处理 ($P < 0.05$),不同水平 S 沉降处理的 CK、LS 和 HS 的有机氮净矿化速率在 0~5 d 差异显著 ($P < 0.05$),其他时间内无显著差异。在 NS 复合沉降处理中,HNLS、HNHS 处理在整个培养过程中的净矿化速率均显著大于 LNLS、LNHS 处理 ($P <$

0.05)。土壤 pH 与土壤净矿化速率具有显著的负相关性 ($P < 0.05$),即土壤净矿化速率随着 pH 的增加而降低。

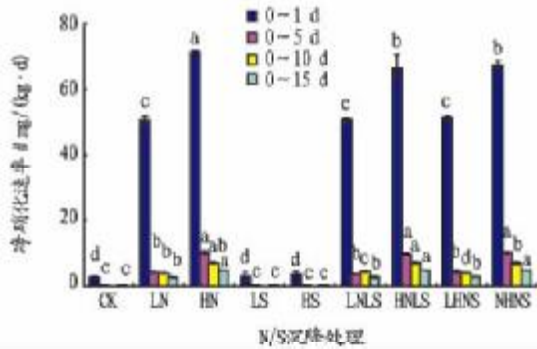
2.3 N/S 沉降对土壤有机氮硝化速率的影响 由图 2 可知,N 沉降对土壤净硝化速率影响显著 ($P < 0.05$),S 沉降对土壤净硝化速率无显著影响,N、S 沉降对土壤净硝化速率的影响无交互作用。随着培养天数的增加,所有处理的土壤净硝化速率均降低。不同水平 N 沉降处理的 CK、LN 和 HN 土壤的有机氮净矿化速率在整个培养过程中均呈显著差异 ($P < 0.05$),不同水平 S 沉降水平的 CK、LS 和 HS 处理净硝化速率在整个培养过程中均无显著差异。在 NS 复合沉降处理中,土壤的净硝化速率较 CK 均显著增大 ($P < 0.05$),当 N 沉



注:不同字母表示相同培养时间不同处理间土壤净矿化速率差异显著($P < 0.05$)。

图 1 N/S 沉降对土壤有机氮净矿化速率的影响

降水平相同、S 沉降水平不相同,土壤的净硝化速率在 0~5 d 具有显著差异($P < 0.05$),而其他时间段内无显著差异;当 S 沉降水平相同、N 沉降水平不相同,土壤的净硝化速率在整个培养过程中都具有显著差异($P < 0.05$)。由表 2 可知,随着培养天数的增加,净硝化速率降低,土壤 pH 与土壤净硝化速率具有显著的负相关性($P < 0.05$),即土壤净硝化速率随着 pH 的增加而降低。



注:不同字母表示相同培养时间不同处理间土壤净硝化速率差异显著($P < 0.05$)。

图 2 N/S 沉降对土壤净硝化速率的影响

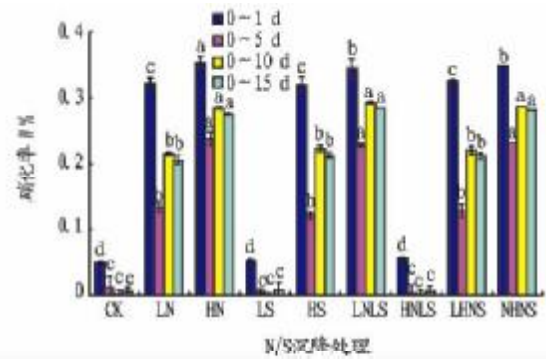
表 2 N/S 沉降下土壤有机氮净矿化速率和土壤净硝化速率的相关性

处理	曲线拟合	Pearson-相关系数	样本数
CK	$Y = 0.326X - 0.803$	0.855**	12
LN	$Y = 0.527X - 3.755$	0.988**	12
HN	$Y = 0.503X - 3.361$	0.988**	12
LS	$Y = 0.289X - 0.986$	0.974**	12
HS	$Y = 0.238X - 0.938$	0.807**	12
LNLS	$Y = 0.522X - 3.949$	0.996**	12
LNHS	$Y = 0.534X - 4.251$	0.994**	12
HNLS	$Y = 0.503X - 3.280$	0.998**	12
HNHS	$Y = 0.508X - 3.529$	0.997**	12
综合	$Y = 0.505X - 2.967$	0.997**	108

注:Y 为土壤净硝化速率,X 为土壤净矿化速率。* * 表示极显著相关性($P < 0.01$)。

2.4 N/S 沉降对土壤硝化率的影响 由图 3 可知,N 沉降对土壤硝化率影响显著($P < 0.05$),S 沉降对土壤硝化率无显著影响,N、S 沉降对土壤硝化率的影响无交互作用。不同水平 N 沉降处理的 CK、LN 和 HN 的土壤硝化率在整个培养

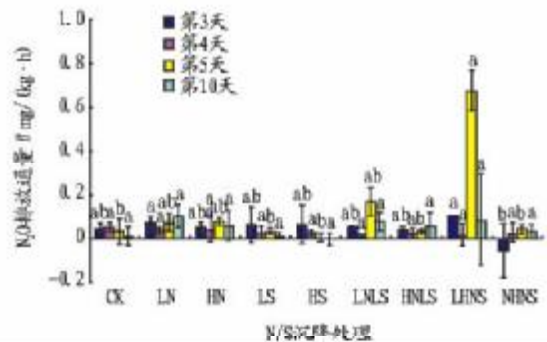
过程中均呈显著差异($P < 0.05$),不同 S 沉降处理的 CK、LS 和 HS 处理土壤硝化率无显著差异,但具有相似的变化趋势。在 NS 复合沉降处理中,HNLS、HNHS 处理的硝化率在整个培养过程中均显著大于 LNLS、LNHS 处理($P < 0.05$)。N 沉降和 NS 复合沉降处理的土壤硝化率呈相似的变化趋势,即最低值均出现在 0~5 d,随后硝化率增大,在培养的最后期又小幅降低。所有处理在整个培养过程中的硝化率均 $< 50\%$,表明该土壤中的无机氮以 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 为主。



注:不同字母表示同一时间 N/S 沉降不同处理间土壤硝化率差异显著($P < 0.05$)。

图 3 N/S 沉降对土壤硝化率的影响

2.5 N/S 沉降对土壤 N₂O 排放的影响 由图 4 可知,N 沉降和 S 沉降处理的土壤 N₂O 排放通量在整个培养过程中均无显著变化。在 NS 复合沉降下,N₂O 排放通量的最大值均出现在培养的第 5 天,在培养的第 5、10 天,LNLS、HNLS 处理的 N₂O 排放通量显著高于 LNHS、HNHS 处理($P < 0.05$)。



注:不同字母表示同一时间 N/S 沉降不同处理间土壤 N₂O 的排放通量差异显著($P < 0.05$)。

图 4 N/S 沉降对土壤 N₂O 的排放通量的影响

3 结论与讨论

研究表明,N 沉降和 NS 复合沉降明显促进土壤的矿化和硝化作用,S 沉降对土壤的矿化和硝化作用影响不大;N/S 沉降影响土壤的 N₂O 排放,其影响效应与 N/S 沉降中 N 沉降和 S 沉降的比例有关。土壤酸碱度是土壤的一个重要基本性质,也是影响土壤肥力的主要因素之一,直接影响土壤养分的存在状态、转化和有效性^[15]。大气沉降对土壤酸度的影响十分显著。长期野外观测表明,100 年的大气沉降使得林地和草地的土壤 pH 从 7 下降到 4,并且导致铝和重金属离子活性增加^[16-17]。研究表明,酸沉降引起土壤酸化,随

时间增加影响程度逐渐降低,与S沉降相比,N沉降对土壤酸化的影响更大。已有研究表明,氮沉降(NO_3^- 或 NH_4^+)的增加引起 NO_3^- 淋溶的增加,一些盐基离子也以相同的速度伴随着 NO_3^- 一起淋失,导致土壤酸度的提高^[18-19]。此外,大气 NH_4^+ 沉降以及随后的硝化作用也加剧土壤的酸化^[20]。该研究也表明,在培养后期,pH有所回升,可能是由于N沉降促进土壤盐基离子释放,中和土壤溶液的酸度,对土壤酸化具有重要的缓冲能力^[21]。研究中,N、S沉降的交互作用对土壤pH的影响显著。NS复合沉降引起的土壤pH的减少量要显著大于N沉降和S沉降。目前,关于NS复合沉降对土壤酸化影响的研究较少,其对土壤酸度的影响过程和机理还有待进一步研究。

该研究表明,N沉降对土壤有机氮净矿化速率影响显著,S沉降对土壤有机氮净矿化速率无显著影响,N、S沉降对土壤有机氮净矿化速率的影响无交互作用。目前,关于大气沉降对土壤有机氮影响的研究主要集中于N沉降,且没有统一的结论。一些研究表明,森林土壤有机氮矿化随着N输入的增加而增加,但随着氮输入增加,有机氮矿化出现先增加后减少的现象^[22-23]。Gundersen等^[24]认为,只有在受N限制的林地,氮素净矿化速率才随N沉降增加而增加,而在N丰富的林地,输入N素后净矿化速度反而下降。也有少数研究表明,N沉降增加对土壤有机氮矿化没有影响^[25]。Aber等^[26]认为,长期的氮沉降会导致温带森林土壤氮素矿化速度稳步增加。瑞典、丹麦和英国针叶林的研究结果表明,当增加氮输入时,氮矿化在短时间内从 $12 \sim 18 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{年})$ 增加到 $47 \sim 53 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{年})$ 。该研究表明,N沉降和NS复合沉降促进土壤有机氮的矿化,HN处理对净矿化速率的促进作用显著大于LN处理。

该试验设置的培养条件(60% WHC、30℃)是该地区土壤进行硝化作用的最有利条件^[27-28]。在最有利条件下土壤硝化率的最高值仍小于50%,表明该地区在自然状态下土壤的硝化作用很弱。已有研究表明,酸性土壤的硝化作用强度随土壤pH的不同而有所差异^[29]。该研究中,土壤的净硝化速率与pH显著相关。S沉降处理的土壤pH高于N沉降和NS复合沉降处理,但净硝化速率小于N沉降和NS复合沉降处理。一方面,可能是由于N沉降和NS复合沉降中土壤硝化作用底物 NH_4^+ -N含量上升,硝化作用增强^[30];另一方面,高浓度 SO_4^{2-} 可能提高硝化微生物细胞膜的渗透压,降低微生物活性,导致硝化作用强度降低^[31],表明pH并不是影响土壤硝化作用的唯一因素。蔡祖聪等^[32]在相同条件下研究我国湿润亚热带酸性森林、灌丛、茶园、稻田和旱地土壤的硝化作用能力,发现绝大部分自然土壤的净硝化速率均小于土壤的净矿化速率,无机氮以铵态氮为主,该地区土壤硝态氮发生淋溶和径流损失。研究中,在自然状态和N/S沉降影响下,土壤有机氮净矿化速率与净硝化速率之间均存在显著相关性,且矿化速率大于硝化速率,与蔡祖聪等研究结果一致。N沉降和NS复合沉降处理中硝化率先下降后上升是由于酸沉降降低了土壤pH,所以

土壤中硝化作用减弱,但随着硝化作用底物铵态氮含量的上升,硝化作用增强,故硝化率再次上升。随着铵态氮的消耗,硝化作用减弱,所以0~15d平均硝化率小于0~10d平均硝化率。

赵维等^[33]研究表明,在 $\text{pH} < 5.0$ 的酸性土壤, N_2O 的排放量受到氮肥品种的影响,硫酸促进硝化作用过程中 N_2O 的产生,因而大幅度增加 N_2O 排放量。研究中,LNLS、HNLS处理表现出与硫酸相似的效应,即增加 N_2O 的排放量。可能原因是N沉降促进了硝化作用,而 SO_4^{2-} 本身可能对 N_2O 排放产生影响。Cai等^[34]研究发现, SO_2 干沉降可促进NO和 N_2O 的排放。NS复合沉降的4种处理中 N_2O 的排放表现出不同的强度和变化规律,表明NS复合沉降对土壤 N_2O 排放的影响与其中N、S含量、比例有关。该研究结果表明,NS复合沉降影响土壤 N_2O 排放,其影响效应与复合沉降中N和S的比例有关。

参考文献

- [1] 邓恩桢. 幼龄林对模拟氮、硫复合沉降的响应[D]. 福州:福建农林大学,2009.
- [2] GALLOWAY J N, COWLING E B. Reactive nitrogen and the world: 200 years of change[J]. *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, 2002, 31(2): 64-71.
- [3] 杜春艳, 曾光明, 黄璐, 等. 酸沉降下韶山森林DOC时空分布及环境影响因子研究[J]. 湖南大学学报:自然科学版, 2009(11): 14.
- [4] AERTS R. Nutrient resorption from senescing leaves of perennials: are there general patterns? [J]. *Journal of Ecology*, 1996, 84(4): 597-608.
- [5] BOWDEN R D, DAVIDSON E, SAVAGE K, et al. Chronic nitrogen additions reduce total soil respiration and microbial respiration in temperate forest soils at the Harvard Forest [J]. *Forest Ecology and Management*, 2004, 196(1): 43-56.
- [6] SIEVERING H. Nitrogen deposition and carbon sequestration [J]. *Nature*, 1999, 400(6745): 629-630.
- [7] ADDISCOTT T, BROOKES P. Nitrogen cycle (Communication arising): What governs nitrogen loss from forest soils [J]. *Nature*, 2002, 418(6898): 604-604.
- [8] 张伟, 莫江明, 方运霆, 等. 氮沉降对森林土壤主要温室气体通量的影响[J]. *生态学报*, 2008, 28(5): 2309-2319.
- [9] 莫江明, 方运霆, 林而达, 等. 鼎湖山主要森林土壤 N_2O 排放及其对模拟N沉降的响应[J]. *植物生态学报*, 2006, 30(6): 901-910.
- [10] 莫江明, 方运霆, 徐国良, 等. 鼎湖山苗圃和主要森林土壤 CO_2 排放和 CH_4 吸收对模拟N沉降的短期响应[J]. *生态学报*, 2005, 25(4): 682-690.
- [11] 庄世坚. 福建省酸雨形势与污染损耗及其控制对策[J]. *台湾海峡*, 2004, 23(1): 101-106.
- [12] 屈玉. 福建省硫沉降变化及云下污染物对雨水酸度影响的数值模拟研究[D]. 南京:南京信息工程大学, 2005.
- [13] 赵月彩, 杨玉盛, 陈光水, 等. 福建万木林自然保护区米槠和杉木凋落叶混合分解研究[J]. *亚热带资源与环境学报*, 2009, 4(2): 53-59.
- [14] BUTTERBACH-BAHL K, GASCHER R, BREUER L, et al. Fluxes of NO and N_2O from temperate forest soils: impact of forest type, N deposition and of liming on the NO and N_2O emissions [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 1997, 48(1/2): 79-90.
- [15] MATSON P A, MCDOWELL W H, TOWNSEND A R, et al. The globalization of N deposition: ecosystem consequences in tropical environments [J]. *Biogeochemistry*, 1999, 46(1/3): 67-83.
- [16] JOHNSTON A E, GOULDING K W T, POULTON P R. Soil acidification during more than 100 years under permanent grassland and woodland at Rothamsted [J]. *Soil Use and Management*, 1986, 2(1): 3-10.
- [17] BLAKE L, GOULDING K W T. Effects of atmospheric deposition, soil pH and acidification on heavy metal contents in soils and vegetation of semi-natural ecosystems at Rothamsted Experimental Station, UK [J]. *Plant and Soil*, 2002, 240(2): 235-251.

(下转第146页)

表2 立地类型对甜菜树生长和成活率的影响

造林地类	立地条件特征	定植时间	定植株数//株	年均高生长量//m	成活率//%
疏林地	具备遮荫条件	2009年6月	200	(0.27 ± 0.06)a	(77.4 ± 6.2)a
灌木林地	不具备遮荫条件	2009年6月	200	(0.12 ± 0.03)b	(52.3 ± 4.3)b

注:数值为平均值 ± 标准差($n=5$);同列数据后不同字母表示差异显著($P<0.05$)。

大关系,当天播种较摆放1 d或2 d后播种出苗率高,且摆放时间越长,出苗率越低。而在采种当天及时脱皮、催芽处理,则出苗率比较理想。育苗时关键是及时清除其外果皮及中果皮,确保内果皮不变质腐烂,保证种子的正常生活力。生产实践中,采摘当天若及时将鲜果去皮、催芽处理,则出苗率高达90%以上。而放置2 d后的种子,其出苗率显著降低,不到50%,该结果在甜菜树种子贮藏过程中应引起高度重视。因为在生产实践过程中,很难做到当天采集的种子当天播种。如何为甜菜树种子的贮藏创造合适的条件,以保证其较高的出苗率是种苗繁育研究中的重点。

(2)在未使用ABT生根粉处理下,甜菜树扦插繁殖的成活率仅为36.4%。甜菜树扦插不易成活,这与其植物学特性有关,可能在该植物体内存在生根抑制素,抑制了不定根的发生,在枝条木质部的初生髓射线与形成层交合处无法形成分生组织,故扦插后无愈伤组织形成。试验中,使用不同浓度的ABT生根粉处理甜菜树扦插条显著提高了扦插繁殖的成活率,但其成活率仍低于50.0%。因此,在生产实践中,种子繁殖是目前成熟适用的种苗繁育方法。如何提高扦插繁殖的成活率以及寻求造成扦插繁殖成活率低下的原因也是今后的研究方向。

(3)从林下仿生栽培试验的结果看,甜菜树不属喜光植物,其生长过程中仅需要一定的散射光,强光照对其生长不利,在疏林地(具遮荫条件)内其年均高生长量和成活率显著高于稀疏灌木林地(不具遮荫条件),因此在人工栽培过程中,宜选择具备林下遮荫条件的疏林地。

(4)甜菜树为云南特有物种,作为一种珍贵的森林蔬菜,其营养价值高,市场开发前景广阔,但自然资源已十分有限。该研究通过设计甜菜树种子繁育、枝条扦插、移栽和林下仿野生栽培试验,指出了甜菜树扦插繁殖成活率较低,适宜用种子繁殖,且种子摆放时间越久,出苗率越低。通过当天层积处理后的种子,其出苗率可达94.6%。在实施人工栽培时,需要考虑遮荫环境以及林地土壤类型,在海拔1500 m以下、降雨量为750 mm以上,土壤类型为沙壤土或紫色土(潮湿)的疏林地种植为宜。

参考文献

- [1] 吴征镒,李德铎.甜菜树属——我国云南产山柚子科一原始新属及其植物地理学意义[J].云南植物研究,2000(3):248-250.
- [2] 杨超本.鳞尾木人工育苗技术与仿生栽培试验[J].林业调查规划,2008,33(4):132-135.
- [3] 杨超本.鳞尾木育苗及栽培技术研究[J].林业调查规划,2008,33(1):116-118.
- [4] 柳建军,许立松,刘锡葵.野生食用蔬菜甜菜树的抗氧化活性研究[J].食品科学,2008(8):125-127.
- [5] 刘锡葵,肖建青.特有野菜甜菜树甜味功能因子的分离与鉴定[J].食品科技,2009(5):207-209.
- [6] 师楠.甜菜树组织培养研究[J].云南农业科技,2011(2):14-17.
- [7] 陶德定.台湾山柚属(山柚子科)的一个新组合[J].广西植物,1993(1):8-11.
- [8] 吴志霜,王跃华.野生植物甜菜树嫩茎叶的营养成分分析[J].植物资源与环境学报,2005(1):60-61.
- [9] 李文政.甜菜树属(中国山柚子科新纪录属)一新种[J].云南植物研究,1989(4):407-408.
- [10] 李文政.我国首次发现甜菜树属新种[J].云南林业,1989(5):27.
- [11] 李文政.甜菜树属在我国云南发现[J].生物科学信息,1990(3):108-109.
- [12] 傅家瑞.关于种子活力的问题[J].植物生理通讯,1980(4):13-17.

(上接第98页)

- [18] BERGKVIST B O, FOLKESON L. Soil acidification and element fluxes of a *Fagus sylvatica* forest as influenced by simulated nitrogen deposition [J]. Water, Air, and Soil Pollution, 1992, 65(1/2): 111-133.
- [19] FERNANDEZ I J, RUSTAD L E. Soil response to S and N treatments in a northern New England low elevation coniferous forest [J]. Water, Air, and Soil Pollution, 1990, 52(1/2): 23-39.
- [20] 孙本华,胡正义,吕家珑,等.大气氮沉降对阔叶林红壤淋溶水化学模拟研究[J].生态学报,2006,26(6):1872-1881.
- [21] 袁颖红,樊后保,李燕燕,等.模拟氮沉降对土壤酸化和土壤盐基离子含量的影响[J].应用与环境生物学报,2011,17(4):461-466.
- [22] ABER J, MCDOWELL W, NADELHOFFER K, et al. Nitrogen saturation in temperate forest ecosystems [J]. Bio Science, 1998, 48(11): 921-934.
- [23] ABER J D, MAGILL A, MCNULTY S G, et al. Forest biogeochemistry and primary production altered by nitrogen saturation [J]. Water, Air, and Soil Pollution, 1995, 85(3): 1665-1670.
- [24] GUNDERSEN P, EMMETT B A, KJØNAAS O J, et al. Impact of nitrogen deposition on nitrogen cycling in forests: a synthesis of NITREX data [J]. Forest Ecology and Management, 1998, 101(1): 37-55.
- [25] EMMETT B A, BOXMAN D, BREDEMEIER M, et al. Predicting the effects of atmospheric nitrogen deposition in conifer stands: evidence from the NITREX ecosystem-scale experiments [J]. Ecosystems, 1998, 1(4): 352-360.
- [26] ABER J D, MAGILL A, BOONE R, et al. Plant and soil responses to chronic nitrogen additions at the Harvard Forest, Massachusetts [J]. Ecological Applications, 1993, 3(1): 156-166.
- [27] VAN CLEEMPUT O, SAMATER A H. Nitrite in soils: accumulation and role in the formation of gaseous N compounds [J]. Fertilizer Research, 1995, 45(1): 81-89.
- [28] VENTEREA R T, ROLSTON D E. Mechanisms and kinetics of nitric and nitrous oxide production during nitrification in agricultural soil [J]. Global Change Biology, 2000, 6(3): 303-316.
- [29] NUGROHO R A, RÖLING W F M, LAVERMAN A M, et al. Low nitrification rates in acid Scots pine forest soils are due to pH-related factors [J]. Microbial Ecology, 2007, 53(1): 89-97.
- [30] 刘菊秀.酸沉降对森林生态系统影响的研究现状及展望[J].生态学杂志,2003,22(5):113-117.
- [31] DARRAH P R, NYE P H, WHITE R E. The effect of high solute concentrations on nitrification rates in soil [J]. Plant and Soil, 1987, 97(1): 37-45.
- [32] 蔡祖聪,赵维.土地利用方式对湿润亚热带土壤硝化作用的影响[J].土壤学报,2009(5):795-801.
- [33] 赵维,蔡祖聪.氮肥品种对亚热带土壤N₂O排放的影响[J].土壤学报,2009,46(2):248-253.
- [34] CAI Z, ZHANG J, ZHU T, et al. Stimulation of NO and N₂O emissions from soils by SO₂ deposition [J]. Global Change Biology, 2012, 18(7): 2280-2291.